



ph. Delannoy

# dossier

## Cavity spot de la carotte, l'épidémiologie appliquée à la gestion des risques parasitaires

Comprendre et modéliser les mécanismes d'une maladie d'origine tellurique dans une perspective de protection intégrée

Frédéric Suffert\*

Les cultures légumières de plein champ, parmi lesquelles la carotte, sont des agrosystèmes particulièrement sensibles.

Les problèmes parasitaires qui les affectent sont principalement de nature tellurique.

Ces maladies racinaires sont aujourd'hui traitées de façon non spécifique avec des moyens chimiques souvent perturbants pour le milieu. Le contexte actuel est favorable à des recherches ayant pour finalité de réduire l'utilisation des produits phytosanitaires (Aubertot *et al.*, 2005) et de mettre en œuvre des stratégies de protection intégrée. Nous présentons ici une recherche effectuée sur le cavity spot, maladie de la carotte due à des *Pythium*.

Ou comment des travaux de recherche en épidémiologie permettent d'aboutir à des conseils pratiques argumentés.

Une partie des travaux d'amont menés à l'INRA sur certains pathosystèmes « modèles » concerne la compréhension du fonctionnement des épidémies racinaires. Elles relèvent de mécanismes particuliers propres au cycle biologique et aux traits d'histoire de vie des agents pathogènes incriminés, mais sont spécifiques du « système sol ». Or ce dernier est un milieu complexe à appréhender tant du point de vue théorique qu'expérimental (Rouxel, 2001).

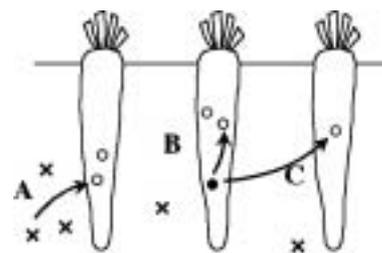
### Pourquoi étudier le cavity spot

Les *Pythium* forment un complexe pathogène de la carotte incluant *P. violae* et *P. sulcatum* (Breton & Rouxel, 1993 ; Suffert & Guibert, 2007) dont la composition varie d'une région de production à l'autre. Ils sont responsables du cavity spot, maladie qui déprécie la qualité des racines (Montfort & Rouxel, 1988 ; Hiltunen & White, 2002).

Le cycle infectieux de ces Oomycètes implique plusieurs types de propagules dont l'importance relative dans le développement d'une épidémie est difficile à quantifier : mycélium saprophyte, oospores issues de la reproduction sexuée, et parfois zoospores (inconnues chez *P. violae*) (Agris, 2005).

Comme pour la plupart des maladies d'origine tellurique, l'estimation du potentiel infectieux d'un sol est longtemps restée l'unique base de gestion du risque parasitaire (Bouhot, 1980). Ce concept, à l'origine d'importantes avancées méthodologiques, est relativement « statique » et mal adapté à une approche de dynamique des populations. En effet, le cycle infectieux théorique de *P. violae* ne fait jusqu'à présent intervenir que des infections à partir de l'inoculum du sol... alors que le caractère monocyclique (un seul cycle annuel) ou polycyclique (plusieurs cycles annuels) d'une épidémie n'a jamais été discuté.

Figure 1 - Illustration des processus infectieux théoriques intervenant dans le cas d'une épidémie d'origine tellurique polycyclique et appliqués au cas du cavity spot



- A - Infection primaire à partir de l'inoculum du sol.
- B - Infection secondaire sur une même racine (auto-infection).
- C - Infection secondaire racine à racine

Par un lien étroit entre expérimentation et éléments conceptuels relevant de la modélisation, nous cherchons à montrer, au travers de l'exemple du cavity spot, en quoi l'analyse raisonnée du développement d'une épidémie d'origine tellurique est une approche efficace (Suffert, 2006). L'objectif est d'identifier, comprendre et hiérarchiser les processus majeurs conditionnant la dynamique spatio-temporelle de la maladie pour ensuite agir sur certains des paramètres qui les régissent (conditions pédo-climatiques, facteurs cultureaux). Ces connaissances ont vocation à être synthétisées au sein d'un modèle exploratoire, basé sur des processus infectieux avérés et quantifiés expérimentalement.

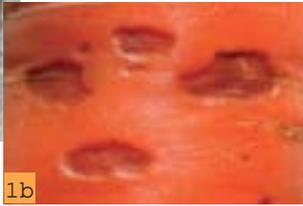
Une hypothèse majeure à tester est classiquement développée en épidémiologie végétale (Zadoks & Schein, 1979), notamment sur les maladies racinaires (Campbell & Benson, 1994) : l'occurrence d'infections primaires (à partir de l'inoculum du sol) et d'infections secondaires (à partir de lésions existantes, qu'il s'agisse d'auto- ou d'allo-infections) (Figure 1).

\* INRA Agrocampus Rennes, UMR1099 BIO3P, Domaine de la Motte, BP 35327, 35653 Le Rheu. Adresse actuelle : INRA/INA P-G, UMR1290 BIOGER-CPP, Épidémiologie végétale, BP 01, 78850 Thiverval-Grignon. fsuffert@grignon.inra.fr

photos Suffert, INRA



Symptômes de cavity spot : on distingue bien les « taches en creux » (c'est la traduction exacte) qu'occasionne cette maladie.



## L'occurrence d'infections secondaires, une base pour représenter l'épidémie

Les symptômes de cavity spot sont homogènes dans leur faciès. Il s'agit de « taches en creux », translucides, elliptiques, aux contours bien délimités (photos 1a et 1b).

La taille, le nombre et la répartition de ces lésions varient à l'échelle d'un peuplement. Certaines lésions sont très petites, d'autres bien plus larges ; elles sont plus ou moins nombreuses sur une même racine, agrégées, voire coalescentes (Phelps, 1991).

### Quatre variables définies

Afin d'évaluer avec précision l'intensité des attaques, quatre variables de maladie ont été définies :

- incidence de maladie  $i$  (%),
- densité de lésions  $d$  (nombre de lésions/racine),
- intensité des symptômes  $si$  (diamètre moyen des lésions),
- surface totale nécrosée  $tda$  (mm<sup>2</sup>/racine).

De telles notations apportent beaucoup d'informations sur le développement d'une épidémie. Certaines variables sont en effet complémentaires en terme d'interprétation biologique.

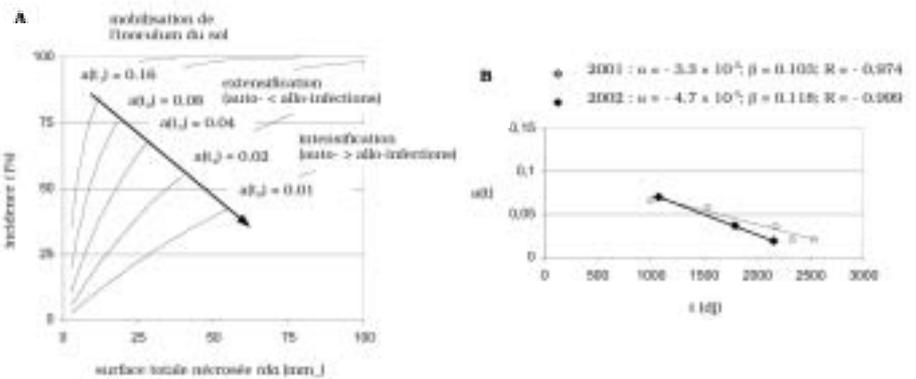
Par exemple, les processus qui contribuent à l'apparition d'une lésion sur une racine saine ne sont pas toujours identiques à ceux contribuant à l'apparition de nouvelles lésions sur cette même racine déjà attaquée.

### Analyse de leur évolution

L'analyse de l'évolution d'un cortège de lésions (aspect, nombre, taille) suggère que leur diamètre moyen augmente au cours du temps (résultats non présentés) ; ce processus contribue à l'accroissement de la surface totale nécrosée  $tda$  qui ne résulte donc pas uniquement de nouvelles infections.

L'analyse de l'évolution au cours du temps des relations pathométriques (c'est-à-dire entre différentes variables) (Large, 1966 ; Seem *et al.*,

Figure 2 - Evolution de la relation pathométrique liant l'incidence de maladie  $i$  à la surface totale nécrosée  $tda$  ajustée avec l'équation  $i = 100 \cdot (1 - \exp(-a(t) \cdot tda))$  (Seem *et al.*, 1984), en fonction de la somme de températures (degrés-jour, base 3,5 °C).



A - La décroissance théorique de  $a(t)$  au cours du temps suggère un changement de phases épidémiologiques : passage d'une phase de mobilisation de l'inoculum primaire à des phases d'intensification et d'extensification des attaques dues aux auto- et allo-infections.

B - La décroissance des valeurs du paramètre  $a(t)$  a été constatée et mesurée par la régression linéaire  $a(t) = a \cdot t + \beta$  à partir de données obtenues au champ au cours de deux années d'épidémie après infestation artificielle du sol par *P. violae*.

1984) est un moyen de formuler des hypothèses mécanistes sur le fonctionnement d'une épidémie.

Par exemple, la relation entre  $i$  et  $tda$  évolue dans le temps et illustre les différentes étapes de l'épidémie : passage d'une phase de mobilisation de l'inoculum primaire à des phases d'intensification et d'extensification (extension spatiale) des attaques (Figure 2). Ce résultat étaye l'hypothèse de l'occurrence d'auto- et d'allo-infections.

L'hypothèse est confortée par le fait que les effets de la densité d'inoculum sur l'intensité des attaques sont prononcés en début d'épidémie mais s'estompent au cours du temps (résultats non présentés), et par la description de cinétiques de cavity spot dont la forme est parfois assimilable à des courbes « bisigmoides ».

### Trois modèles de cinétiques

Trois modèles, intégrant chacun les deux types de processus, ont été ajustés à des

données obtenues sur trois années (2001-2003, Suffert, 2007) : modèle logistique, modèles de Hau & Amorim (Hau *et al.*, 1993) et de Brassett & Gilligan (1988).

Les ajustements obtenus pour 2001 sont présentés figure 3 p. 38. Le modèle de Hau & Amorim illustre distinctement la phase de transition entre infections primaires et secondaires (apparition d'un plateau entre 500 et 1500 dj).

écrans extérieurs - écrans solaires -  
écrans thermiques - filets anti-insectes...

**texinov**  
AGROTEXTILES

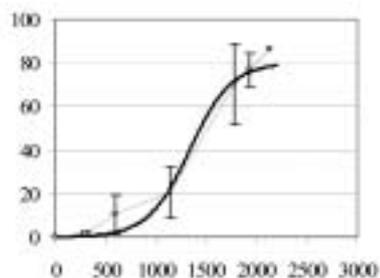
Fabricant français  
spécialiste des agrotextiles  
depuis plus de 20 ans!

info@texinov.fr www.texinov.fr

Comprendre le cycle, pourquoi ?

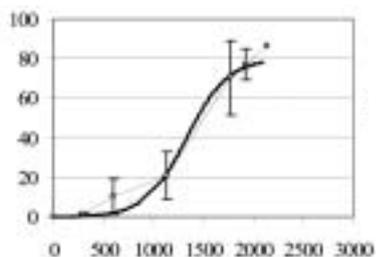
La compréhension du cycle biologique d'une maladie est nécessaire, certainement autant que la description de ses cinétiques épidémiques dans lesquelles les effets du cycle sur les taux d'infection peuvent se confondre avec les effets de facteurs environnementaux (Pfender, 1982).

Figure 3 - Ajustement de trois modèles intégrant l'occurrence d'infections secondaires (modèle logistique, modèle de Hau & Amorim, et modèle de Brassett & Gilligan) à une cinétique d'incidence moyenne de cavity spot obtenue après infestation artificielle du sol par *P. violae*.



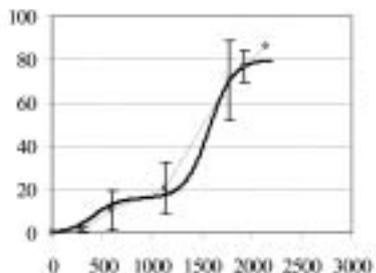
modèle logistique

$$i(t) = i_{max} \times \frac{e^{(a+bt)}}{1 + e^{(a+bt)}}$$



modèle de Brassett & Gilligan

$$i(t) = i_{max} \times \frac{1 - e^{-(c_1 + c_2)t}}{1 + \left(\frac{c_2}{c_1}\right) e^{-(c_1 + c_2)t}}$$



modèle de Hau & Amorim

$$i(t) = \frac{K_1}{1 + e^{(-\alpha_1(t-t_{m1}))}} + \frac{K_2}{1 + e^{(-\alpha_2(t-t_{m2}))}}$$

Comprendre le cycle, comment ?  
L'expérience indispensable

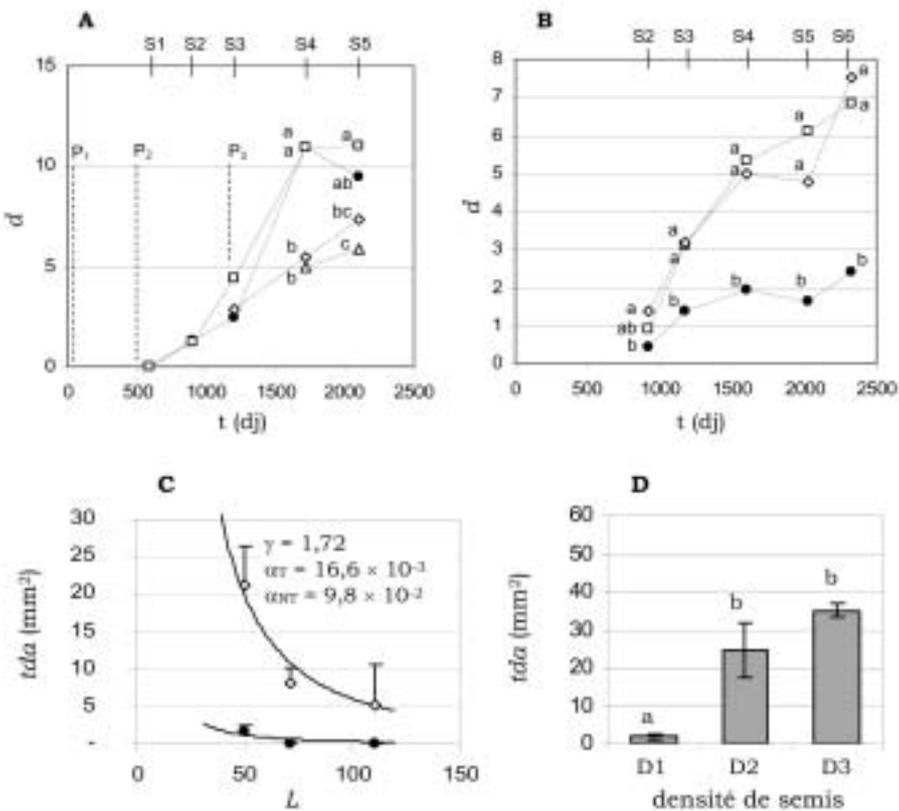
Les indices précédents sont des arguments majeurs... mais ne constituent pas pour autant la preuve formelle de l'occurrence des infections secondaires. Une démonstration par l'expérience est indispensable.

Un protocole d'expérimentation adapté aux contraintes du pathosystème *Pythium* sp.-*Daucus carota* a été élaboré. Une méthodologie originale de transplantation de racines « sources » inoculées par *P. violae* a démontré que les lésions étaient à l'origine de contaminations racines à racines (allo-infections) (photos 2A, 2 B, 2C, 2D et 2E) (Suffert & Montfort, 2007).

La possibilité d'auto-infections a été suggérée par des observations ponctuelles *in situ*.

Le caractère polycyclique d'une épidémie de cavity spot a ainsi pour la première fois été explicitement démontré.

Figure 4 - Effet de trois facteurs sur des cinétiques de cavity spot au champ (A et B) et sur les infections secondaires reproduites en microcosmes (C et D).



A - Effet de la période de traitement avec un fongicide anti-Oomycètes sur la densité de lésion *d* entre les prélèvements S1 et S5 (● = non traité ; □ P<sub>1</sub> = traitement au semis ; ◇ P<sub>2</sub> = traitement 5 semaines après semis ; △ P<sub>3</sub> = traitement 9 semaines après semis). Les lettres précisent si les moyennes calculées sont significativement différentes (ANOVA, test de Scheffe, p < 0,05).

B - Effet du taux moyen d'humidité du sol (TMH) modulé par trois régimes d'irrigation sur la densité de lésion *d* entre les prélèvements S2 et S6 (● = non irrigué, TMH = 11,5 % ; ◇ = niveau intermédiaire, TMH = 17,7 % ; □ = niveau élevé, TMH = 20,2 %).

C - Exemple de gradient de dispersion d'infections secondaires, estimé par le modèle en puissance  $t d a = a L^\gamma$  (L est la distance entre la racine cible et la racine source la plus proche ; ● T = avec traitement fongicide ;

Mécanismes biologiques :  
les hypothèses

La question des mécanismes biologiques à l'origine des infections secondaires se pose. Les principales hypothèses issues de la littérature sont basées sur la biologie des *Pythium* mais aussi sur des réflexions communes à l'ensemble des parasites d'origine tellurique :

- la première interrogation concerne la possibilité de contaminations par contact direct entre radicelles. Les allo-infections semblent être une conséquence directe de la croissance saprophytique du mycélium dans le sol, mais il est possible que les racines adventives amplifient l'extension de la maladie en servant de points d'appuis aux infections secondaires par des contacts entre radicelles saines et infectées, et en stimulant la croissance saprophytique des *Pythium* par la sécrétion d'exsudats racinaires ;
- la seconde interrogation porte sur les formes de dissémination à l'origine des infections

secondaires. On ne peut exclure que les zoospores soient impliquées à ce stade chez la plupart des *Pythium* (à l'exclusion de *P. violae*). Le rôle des différentes structures (mycélium, zoospores, oospores) doit être pris en compte pour estimer le gradient de dispersion de la maladie.

## Effets de facteurs environnementaux et culturaux

### Trois facteurs testés

Plusieurs facteurs environnementaux et culturaux sont connus pour avoir un effet sur le développement du cavity spot : l'humidité du sol, son aération, sa teneur en calcium, la température, la fertilisation azotée, les précédents culturaux, les traitements fongicides et les désinfections de sol (Hiltunen & White, 2002).

Les effets de trois de ces variables (période d'application d'un fongicide anti-Oomycètes, humidité du sol et densité de semis) ont été testés sur les cinétiques de maladie. Certains l'ont été spécifiquement sur les infections secondaires par la méthode de transplantation racinaire décrite précédemment (Figure 4).

### Période de traitement fongicide

Certaines périodes de traitement fongicide ont retardé le développement des épidémies au champ (Figure 4A). Les applications en cours de végétation ont eu des effets prononcés et une période d'efficacité relativement large. Elles ont réduit les attaques de façon significative, en particulier pendant les phases d'intensification et d'extensification de l'épidémie.

Des expérimentations en microcosmes (bacs rectangulaires 35 x 25 cm) ont confirmé qu'un traitement pouvait être actif contre les infections secondaires (résultats non présentés).

### Humidité du sol

L'effet positif du taux moyen d'humidité du sol (TMH) sur le développement d'une épidémie a été démontré au champ (Figure 4B), comme pour plusieurs autres maladies telluriques (Cook et Papendick, 1972).

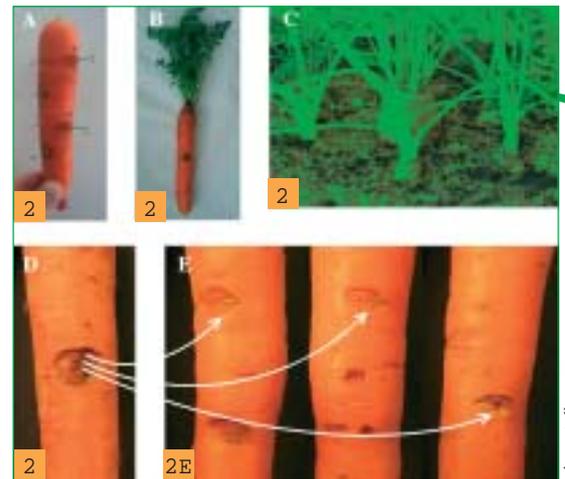
Ce facteur a eu une influence sur l'ensemble des processus épidémiologiques décrits (infections primaires et secondaires et extension de la taille des lésions).

Des hypothèses fonctionnelles peuvent être émises. Un sol trop sec limiterait l'accessibilité des tissus hôtes à l'inoculum primaire. L'humidité favoriserait les infections secondaires et la dissémination des *Pythium* ; elle serait déterminante dans les phases d'extensification de l'épidémie. De plus, elle limiterait les processus de « cicatrisation » à l'origine de symptômes bien délimités, favorisant ainsi l'augmentation du « potentiel » d'infections secondaires par l'accroissement du diamètre des lésions.

### Densité de semis

L'effet de la distance entre racines sur la dynamique des allo-infections a été démontré en microcosmes par une analyse spatiale explicite (Figure 4 C), comme pour plusieurs autres maladies (Burdon et Chilvers, 1982).

L'effet global de la densité de semis a été plus hétérogène mais significatif dans l'exemple proposé (Figure 4 D) ; ce facteur n'est pas déterminant lorsque les conditions de croissance du mycélium de *P. violae* sont optimales (température voisine de 20 °C et TMH élevé) : le mycélium semble en effet atteindre sans difficulté les racines adjacentes quelle que soit la densité de peuplement (dans la limite de distances entre plantes égales à 100 mm), comme l'illustre le gradient de dispersion.



Infections secondaires (E) issues d'une racine « source » inoculée par *P. violae* (A, B et D) puis transplantée au sein d'un peuplement de racines « cibles » (C).

photos Suffert, INRA

## Un modèle pour comprendre

### Conception d'un modèle déterministe

À partir de ces connaissances, il est possible de concevoir un modèle déterministe simple basé sur l'occurrence d'infections primaires et d'infections secondaires (modèle à compartiment non présenté ici), comme dans le modèle de Brassett et Gilligan (1988) qui peut également intégrer la décroissance de l'efficacité de l'inoculum primaire au cours du temps. Conçu comme un outil simulant le fonctionnement d'une épidémie à l'échelle d'une racine, il suggère des pistes de recherches sur l'efficacité des différentes méthodes de lutte et leur possibilité de complémentarité.

Nous nous plaçons dans une perspective de protection intégrée, système de lutte caractérisé par un assemblage de méthodes à effets partiels, qui permet d'agir par des modes d'action variés sur des processus différents, et donc d'accroître l'efficacité et la durabilité des stratégies (Suffert, 2005). Nous nous focalisons ici sur la première étape, celle de l'intégration verticale des moyens de lutte, c'est-à-dire les combinaisons de pratiques ayant pour cible exclusive le cavity spot.

### Principaux facteurs dégagés et conseils qui en découlent

Les principaux facteurs ou pratiques culturales susceptibles d'influencer le développement d'une épidémie sont récapitulés tableau 1 à la lumière de nos connaissances sur l'expres-

Tableau 1 - Effets des facteurs les plus significatifs sur le développement d'une épidémie de cavity spot.

Facteurs	Processus affecté	Infections primaires (inoculum du sol et résidus de culture)	Infections secondaires (auto- et allo infections)	Extension de la taille des lésions
Faible humidité du sol		++	+++	+++
Application d'un fongicide anti-Oomycètes		++	+++	o
Désinfection du sol		+++	+	o
- effet à court terme		-	o	o
- effet à long terme				
Structure du semis (densité réduite ou disposition optimisée)		o	+/**	o
Précédents non hôtes. Pas de double culture		+/**	o	o
Plantes de coupure aux propriétés allélopathiques		+/**	+	o
Variété moins sensible ou résistante		+/**	+	+++
Aération du sol		+	+	o
Résistance naturelle du sol (antagonismes microbiens)		+/**	+/**	o
Récolte précoce avant la fin de l'hiver		+	+++	++

+++ effet positif très marqué (défavorable à la maladie), ++ effet positif marqué, + effet positif assez peu marqué, o effet très peu marqué ou nul, - effet négatif (maladie favorisée).

## Bibliographie

- **Agrios G., 2005** - *Plant pathology*. 5<sup>th</sup> ed. Elsevier, 922 pp.
- **Aubertot J.N., Barbier J.M., Carpentier A., Gril J.J., Guichard L., Lucas P., Savary S., Savini I. et Voltz M., 2005** - *Pesticides, agriculture et environnement. Réduire l'utilisation des pesticides et limiter leurs impacts environnementaux. Expertise scientifique collective, synthèse du rapport, INRA et CEMAGREF*, 64 p.
- **Bouhot D., 1980** - *Le potentiel infectieux des sols*. Thèse de Doctorat. Université de Nancy, 142 p.
- **Brassett P.R. et Gilligan C.A., 1988** - *A model for primary and secondary infection in botanical epidemics*. Zeitschrift für Pflanzenkrankheit und Pflanzenschutz 95(4): 352-360.
- **Breton D. et Rouxel F., 1993** - *Données récentes sur le cavity spot de la carotte en France*. Acta Horticulturae 354: 159-170.
- **Burdon J.J. et Chilvers G.A., 1982** - *Host density as a factor in plant disease ecology*. Annual Review of Phytopathology 20: 143-166.
- **Campbell C.L. et Benson D.M., 1994** - *Epidemiology and management of root diseases*. Springer-Verlag, Berlin, 344 p.
- **Cook R.J. et Papendick R.I., 1972** - *Influence of water potential of soils and plants on root disease*. Annual Rev. of Phytopathol. 10: 349-374.
- **Hau B., Amorim L. et Bergamin Filho B., 1993** - *Mathematical functions to describe disease progress curve of double sigmoid pattern*. Phytopathology 83(9): 928-932.
- **Hiltunen L.H. et White J.G., 2002** - *Cavity spot of carrot (Daucus carota)*. Annals of Applied Biology 141: 201-223.
- **Large E.C., 1966** - *Measuring plant disease*. Annual Review of Phytopathology 4: 9-28.
- **Montfort F. et Rouxel F., 1988** - *La maladie de la tache de la carotte due à Pythium violae: données symptomatologiques et étiologiques*. Agronomie 8(8): 701-706.
- **Pfender W.F., 1982** - *Monocyclic and polycyclic root diseases: distinguishing between the nature of the disease cycle and the shape of the disease progress curve*. Phytopathology 72(1): 31-32.
- **Phelps K., White J.G. et Henn A.J., 1991** - *Studies on the frequency distribution of Pythium-induced cavity spot of carrots*. An. of Appl. Biol. 119(1): 21-30.
- **Rouxel F., 2001** - *Le sol, un milieu complexe à appréhender*. Phytoma-LDV 542: 10-12.
- **Seem R.C., 1984** - *Disease incidence and severity relationships*. Annual Review of Phytopathology 22: 137-150.
- **Suffert F., 2005** - *Cadre théorique de la notion de complémentarité caractérisant des stratégies de protection des cultures*. Phytoprotection 86: 89-92.
- **Suffert F., 2006** - *Épidémiologie du cavity spot de la carotte. Perspectives d'application en protection intégrée*. Thèse de Doctorat. Agrocampus Rennes, 328 p. (accessible en ligne sur <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-0019268>).
- **Suffert F. et Guibert M., 2007** - *The ecology of a Pythium community in relation to the epidemiology of carrot cavity spot*. Applied Soil Ecology 35 (3): 488-501.
- **Suffert F., 2007** - *Modélisation des cinétiques de la maladie de la tache de la carotte provoquée par un complexe de Pythium dominé par du P. violae*. Canadian Journal of Plant Pathology (sous presse)
- **Suffert F. et Montfort F., 2007** - *Demonstration of secondary infection by Pythium violae in epidemics of carrot cavity spot using root transplantation as a method of soil infestation*. Plant Pathology (sous presse).
- **Zadoks J.C. et Schein R.D., 1979** - *Epidemiology and plant disease management*. Oxford University Press, New York, 427 p.

sion de la maladie, des processus épidémiologiques qui la conditionnent, et des facteurs testés précédemment.

Une pratique limitant les infections primaires peut être considérée comme complémentaire d'une pratique limitant les infections secondaires ou l'extension de la taille des lésions :

— Pour réduire les infections primaires, on peut limiter la densité initiale d'inoculum, notamment par des désinfections de sol ou l'application précoce d'un fongicide, et par une meilleure gestion de l'assolement et l'introduction dans la rotation de précédents non hôtes ou de cultures intermédiaires à vocation assainissante.

— Pour réduire les infections secondaires, il est souhaitable de tenir compte de l'humidité du sol (en particulier adapter la date de récolte de carottes conservées au champ pendant l'hiver en fonction du TMH ou de la hauteur de précipitations), optimiser la structure du semis, ou réaliser des traitements fongicides ciblés en se basant sur l'analyse de la dynamique temporelle d'une épidémie.

— Les facteurs permettant de réduire l'extension des lésions sont moins nombreux ; nous suggérons d'utiliser des variétés de carottes moins sensibles, particulièrement efficaces pour limiter la surface totale nécrosée (les lésions ont alors un aspect cicatrisé), ou de limiter la durée de conservation au champ.

## Conclusion

En épidémiologie végétale, l'insuffisance du travail expérimental est un piège possible.

Plus le sujet paraît complexe et les hypothèses nombreuses, plus le contrôle par l'expérience est nécessaire... mais s'avère difficile à organiser et interpréter. À l'inverse, plus les hypo-

thèses sont réduites et le modèle simple (voire simpliste), plus la tentation est grande de limiter les expériences à un seul champ disciplinaire en réponse à la question stricte posée. L'acquisition des connaissances nécessaires à une application pratique avance par étapes successives. Il faut donc en général mener, autour de l'action expérimentale, une réflexion conceptuelle, alternant formalisations

simples et théories parfois plus complexes. La démarche suivie dans cet article aurait vocation à être généralisée à d'autres pathosystèmes telluriques peu étudiés : partir d'une approche pluridisciplinaire et descriptive, considérer les apports de l'expérimentation d'une part et l'utilité de la modélisation d'autre part, pour exploiter toute connaissance méritant d'être « formalisée ».

## Résumé

Les *Pythium* sont responsables du cavity spot de la carotte, maladie racinaire qui affecte la qualité des récoltes. La démarche adoptée permet d'identifier, comprendre et hiérarchiser les processus déterminant la dynamique spatio-temporelle de cette maladie. L'existence d'infections secondaires (auto- et allo-infections), donc la nature polycyclique d'une épidémie de cavity spot, sont prouvées expérimentalement.

Cette hypothèse est initialement étayée par deux étapes de l'analyse, l'une portant sur l'examen de relations pathométriques, et l'autre sur les ajustements de modèles à des cinétiques de la maladie. Les résultats obtenus permettent de concevoir un modèle épidémiologique exploratoire, basé sur l'occurrence des infections primaires et secondaires. Les effets de différents facteurs sur ces processus, comme l'application d'un fongicide, l'humidité du sol et la densité de semis, sont testés. L'association de moyens de lutte complémentaires dans le cadre de stratégies de protection intégrée est envisagée.

**Mot-clés :** carotte, cavity spot, *Pythium violae*, épidémiologie, infection primaire, infection secondaire, auto-infection, allo-infection, humidité du sol, densité de semis.

## Summary

In carrots, one of the major sanitary problems is cavity spot, a root disease caused by a complex of *Pythium* spp. which affects root quality. The objectives of the present research were to identify, understand and hierarchise the processes that induce the spatio-temporal kinetics of carrot cavity spot epidemics. The occurrence of primary and secondary infections was demonstrated and quantified experimentally for the first time in this pathosystem.

The analysis of pathometric relationships between disease assessment variables and the fitting of simulation models to observed epidemiological data confirmed the occurrence of both types of infections. An epidemiological model was elaborated, based on the processes quantified experimentally. The effect of different factors, such as soil moisture, seed density and timing of fungicide applications, on these epidemiological processes was tested. Some scenarios combining control methods for integrated pest management of carrot cavity spot were discussed.

**Key words :** carrot, cavity spot, *Pythium violae*, epidemiology, primary infection, secondary infection, autoinfection, alloinfection, soil moisture, seed density.